

УДК 004.7

DOI: 10.31673/2412-9070.2025.011762

І. А. БУЧЕНКО, старший викладач;

ORCID: 0009-0003-9012-9632

Н. О. ЛАЩЕВСЬКА, канд. техн. наук, доцент,

ORCID: 0000-0003-2148-115X

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ

РОЛЬ ПЕРИФЕРІЙНИХ ОБЧИСЛЕНЬ (EDGE COMPUTING) В КОМП'ЮТЕРНИХ МЕРЕЖАХ

У сучасних комп'ютерних мережах периферійні обчислення набувають все більшої актуальності, зокрема через їх вплив на ефективність обробки даних в умовах зростання обсягів даних, функціонування мережесистем, потреб у реальному часі, а також високих вимог до швидкості та безпеки передавання інформації.

Основні проблеми, що виникають у традиційних централізованих системах обчислень, включають затримки в обробці даних, перевантаження мережі, зростання витрат на обслуговування центрів обробки даних та ризики втрати конфіденційності. Граничні обчислення здатні вирішити ці проблеми шляхом обробки даних безпосередньо на периферії мережі, ближче до джерела їхнього формування. Це забезпечує зменшення затримок, оптимізацію використання пропускну здатності мережі та підвищення рівня безпеки, адже дані залишаються локальними.

Зі стрімким розвитком 5G і технологій штучного інтелекту (AI) все більше інтелектуальних пристроїв підключаються до мережі Інтернет, а також зростає попит на обчислювальні послуги. Традиційне поєднання хмарних обчислень та Інтернету речей (IoT) поступово виявило деякі недоліки, такі як затримка передавання, значно знижена швидкість передавання та тиск на пропуску здатність мережі. Граничні обчислення (периферійні обчислення, edge computing) — це нова обчислювальна парадигма, яка розміщує послугу поблизу фізичної межі кінцевих користувачів. Завдяки тісній близькості, щільному розподілу та низькій затримці периферійні обчислення можуть ефективно зменшити затримку, підвищити швидкість передачі та зменшити тиск на пропуску здатність. На даний час з'являється все більше досліджень щодо периферійних обчислень. Дослідження системного відображення використовує метод візуалізації для узагальнення певної галузі.

Розглянуто концепцію, характеристики та основні аспекти периферійних обчислень (edge computing), їх роль у комп'ютерних мережах і прикладні можливості. Досліджено сучасні апаратні рішення для реалізації периферійних обчислень. Наведено порівняння периферійних, туманних та хмарних обчислень, визначено їх переваги, недоліки та сфери застосування. Запропоновано практичні приклади використання периферійних обчислень у промисловості, охороні здоров'я, автономному транспорті, енергетиці та геймінгу. Наведено рекомендації щодо вибору обладнання та впровадження периферійних обчислень залежно від конкретних потреб користувачів і організацій.

Ключові слова: комп'ютерна мережа, периферійні обчислення, edge computing, центр обробки даних, хмарні обчислення, Інтернет речей, IoT, корпоративні мережі, управління комп'ютерною мережею.

Постановка проблеми

Дані зростають вражаючими темпами і передбачити скільки даних є у світі зараз, не кажучи вже про найближчі роки, досить важко. У 2023 році глобальний обсяг даних досяг приблизно 120 зетабайт. Це значне зростання у порівнянні з попередніми роками, оскільки все більше да-

© Бученко І. А., Лащевська Н. О., 2025

них генерується через різні цифрові канали, такі як соціальні мережі, хмарні сховища та пристрої Інтернету речей (IoT) тощо.

Команда IDC добре попрацювала над прогнозом та припустила, що глобальний обсяг даних збільшиться до 175 зетабайт до 2025 року [1]. Приблизно 90 зетабайт цих даних надходять лише з пристроїв IoT. Тим часом, Forbes прогнозує, що 150 трильйонів гігабайт даних у реальному часі потребуватимуть аналізу до 2025 року [2].

Більше половини світового трафіку даних припадає на відеоконтент, при цьому суттєвий внесок також роблять соціальні мережі та відеоігри. Такий швидкий ріст обумовлений розвитком хмарних обчислень, використанням IoT та зростанням обсягів контенту, що створюється користувачами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Граничні обчислення (периферійні обчислення, edge computing) — це метод оптимізації хмарних обчислювальних систем шляхом виконання обробки даних на межі мережі, поблизу речей або джерел даних, що об'єднує можливості мереж, сховищ і програм. Надаючи граничні інтелектуальні послуги, периферійні обчислення відповідають ключовим вимогам цифровізації галузі щодо гнучкого підключення, послуг у реальному часі, оптимізації даних, інтелекту додатків, безпеки та захисту конфіденційності. Виконуючи роль мосту між фізичним і цифровим світами, периферійні обчислення дозволяють використовувати розумні активи, шлюзи, системи та служби [2, с.8].

Метою статті є визначення ролі периферійних обчислень (edge computing) у комп'ютерних мережах, огляд і порівняння різних моделей обчислень і вибір кращої, визначення сфер застосування периферійних обчислень та обладнання, яке необхідно для периферійних обчислень.

Основний матеріал

Периферійні обчислення – це парадигма розподілених обчислень, що здійснюються в межах досяжності кінцевих пристроїв. Даний тип обчислень використовується для скорочення часу мережного відгуку, а також більш ефективного використання пропускну здатності мережі. Периферійні обчислення являють собою своєрідний «кеш» для даних і, звичайно ж, для обчислень, причому в найширшому розумінні.

Прогрес у мережних технологіях, таких як бездротова мережа 5G, зробив можливим вирішення цих проблем у глобальному комерційному масштабі. Мережі 5G можуть обробляти величезні обсяги даних, що надходять до пристроїв і центрів обробки даних майже у реальному часі.

Але прогрес у бездротових технологіях є лише частиною рішення для того, щоб периферійні обчислення працювали в масштабі. Для зменшення затримки та отримання результатів у реальному часі також важливо вибирати, які дані включати та виключати з потоків даних у мережі [4].

Обладнання для периферійних обчислень. У периферійних обчисленнях більша частина обчислювальних потужностей фізично розташована в місці збору даних або поблизу нього, тому edge computing залежать від надійного обладнання для обробки даних у реальному часі, скорочення затримок і оптимізації роботи мереж. Правильний вибір обладнання дозволяє мінімізувати залежність від централізованих серверів і хмар, що сприяє підвищенню продуктивності, безпеки та ефективності мережних систем.

Вибір обладнання для периферійних обчисленнях залежить від багатьох факторів, таких як масштаб проєкту, вимоги до обчислювальної потужності, умови експлуатації, бюджет та інші. Наведемо приклад найпоширеніших типів обладнання, які використовуються для реалізації edge computing:

1. Периферійні сервери. Компактні сервери або міні-ЦОД (Data Centers), встановлені ближче до кінцевих пристроїв або джерел даних. Вони забезпечують обробку даних локально, зменшуючи залежність від хмарних обчислень, мають високу продуктивність і здатність до

масштабування, а також підтримують роботу з великим обсягом даних у реальному часі. Прикладами таких серверів є: Dell EMC PowerEdge XR12 та HPE Edgeline EL8000;

2. Периферійні шлюзи (Edge Gateways). Пристрої, які забезпечують підключення між кінцевими пристроями та локальними або хмарними обчислювальними системами. Такі шлюзи збирають, фільтрують і обробляють дані перед їх передаванням до центральних серверів або хмари, забезпечують безпеку даних через вбудовані протоколи шифрування, а також знижують навантаження на центральну мережу. Прикладами є: Cisco Edge Computing Gateways і Advantech IoT Gateways;

3. Граничні маршрутизатори (Edge Routers). Спеціалізовані маршрутизатори, які об'єднують функції мережної маршрутизації та обробки даних. Зменшують затримки у передаванні даних, можуть виконувати попередню обробку трафіку, зменшуючи навантаження на сервери, а також граничні маршрутизатори підходять для розподілених мереж. Прикладами edge routers є: Juniper Networks MX Series, Cisco IR1101.

4. IoT-пристрої (Internet of Things). До IoT-пристроїв входять сенсори, камери, розумні пристрої, що генерують дані й можуть виконувати базову обробку. Вони дозволяють збирати й обробляти дані безпосередньо на місці їхнього виникнення, підходять для інтелектуальних систем, таких як «розумні» міста, автономний транспорт, промисловість. Приклад: Amazon AWS IoT Greengrass-enabled devices;

5. Граничні GPU-станції (Edge GPU Stations) – системи з графічними процесорами для виконання завдань, пов'язаних зі штучним інтелектом і машинним навчанням. Ідеально підходять для обробки великих обсягів даних у реальному часі (наприклад, відеоаналітика, розпізнавання облич), виконують ресурсоємні завдання без передавання даних до хмари. Наприклад, NVIDIA Jetson AGX Orin, Intel Movidius Neural Compute Stick;

6. Системи безперебійного живлення (UPS) – це пристрої для резервного живлення периферійних серверів та інших пристроїв. UPS забезпечують стабільну роботу систем у разі збоїв енергопостачання та підвищують надійність периферійних обчислень у критичних системах. Для прикладу це можуть бути APC Smart-UPS або Eaton 9PX UPS.

Обладнання периферійних обчислень має бути міцним і надійним. Часто це обладнання повинно витримувати екстремальні погодні умови, навколишнє середовище та механічні умови, тому таке обладнання повинно бути: без вентилятора та вентиляції, стійке до температур, стійке до різких рухів, повинно мати малий форм-фактор, обладнане достатньою кількістю пам'яті, сумісне із новим і застарілим обладнанням, створено з кількома варіантами підключення, здатне підтримувати кілька типів джерел живлення, захищене від кібератак і стійке до фізичного втручання.

Вибір між хмарними, периферійними та туманними обчисленнями залежить від конкретних потреб застосування. Хмарні обчислення (cloud computing) ідеально підходять для великих обсягів даних, які не вимагають низької затримки, таких як аналітика даних, машинне навчання та зберігання резервних копій. Хмарні обчислення дозволяють компаніям зберігати, обробляти та іншим чином працювати із своїми даними на віддалених серверах, розміщених в Інтернеті. Комерційні постачальники хмарних обчислень, такі як Microsoft Azure, пропонують цифрові обчислювальні платформи та набори послуг, які компанії можуть використовувати для зменшення або ліквідації своєї фізичної IT-інфраструктури та пов'язаних з нею витрат. Хмарні обчислення також дозволяють організаціям надавати безпечні можливості віддаленої роботи своїм співробітникам, легше масштабувати свої дані та додатки та використовувати переваги IoT [4].

Периферійні обчислення (edge computing) оптимальні для додатків, які вимагають низької затримки, високої безпеки та обробки даних у реальному часі, таких як автономні автомобілі, промисловий Інтернет речей (IoT) та розпізнавання мови. Периферійні обчислення дозволяють отримувати, обробляти й аналізувати дані на найвіддаленіших ділянках мережі організації: «на межі». Це дозволяє організаціям і галузям працювати з терміновими даними у режимі реального часу, іноді навіть без необхідності зв'язуватися з основним центром обробки

даних, а часто лише надсилаючи найбільш відповідні дані в основний центр обробки даних для швидшої обробки. Це позбавляє основні обчислювальні ресурси, як-от хмарні мережі, від перенасичення нерелевантними даними, що зменшує затримку для всієї мережі. Це також зменшує витрати на підключення до мережі [4].

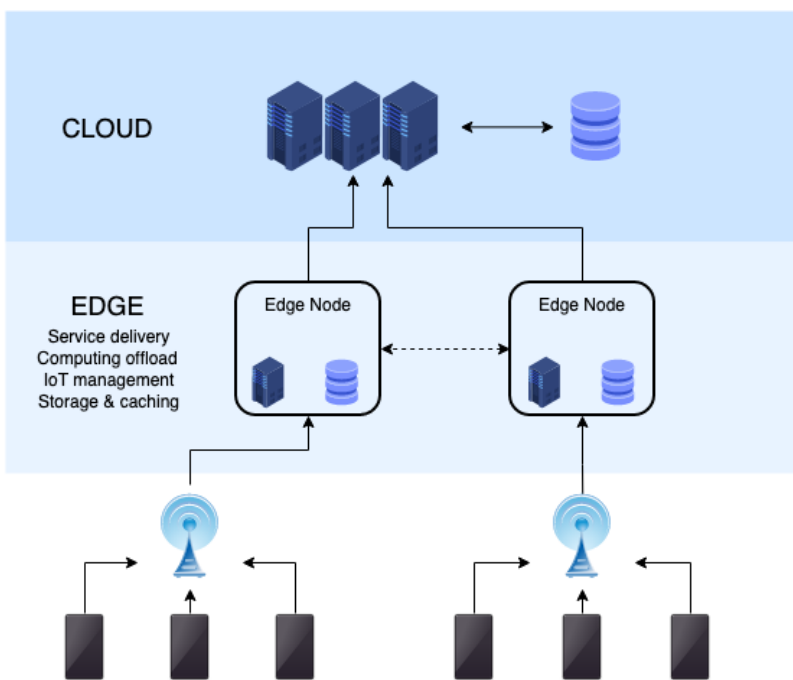


Рис. 1. Інфраструктура периферійних обчислень [5]

Туманні обчислення (fog computing) поєднують переваги хмарних і периферійних обчислень, забезпечуючи баланс між затримкою, пропускну здатністю та вартістю. Підходять для додатків, які вимагають обробки великих обсягів даних з низькою затримкою, таких як «розумні» міста та медичні застосування. Туманні обчислення дозволяють тимчасово зберігати та аналізувати дані на рівні обчислень між хмарою та периферією у випадках, коли неможливо обробити периферійні дані через обмеження обчислень периферійного обладнання. З «туману» відповідні дані можна надсилати на хмарні сервери для довгострокового зберігання та подальшого аналізу та використання.

Не надсилаючи всі дані периферійних пристроїв для обробки у центральний центр обробки даних, туманні обчислення дозволяють компаніям трохи зменшити навантаження на свої хмарні сервери, що допомагає оптимізувати ефективність ІТ [4].

Важливо відзначити, що периферійні обчислення не залежать від туманних обчислень. Fog computing — це просто додаткова опція, яка допомагає компаніям підвищити швидкість, продуктивність і ефективність у певних сценаріях периферійних обчислень.

Кожна з цих моделей має свої переваги та недоліки і оптимальний вибір визначається такими факторами: затримка, пропускна здатність, вартість, безпека, масштабованість. (таблиця).

Порівняння моделей обчислень

| Характеристика | Хмарні обчислення | Периферійні обчислення | Туманні обчислення |
|----------------------------|-----------------------|---|--------------------------|
| Місцезнаходження обчислень | Віддалені дата-центри | Безпосередньо на пристроях або в їхній близькості | Між хмарою та пристроями |
| Затримка | Висока | Низька | Середня |
| Пропускна здатність | Висока | Середня | Середня |
| Вартість | Гнучка модель оплати | Високі початкові інвестиції | Середня |
| Безпека | Може бути вразлива | Вища безпека | Середня |
| Масштабованість | Висока | Обмежена | Середня |

Наведемо реальні приклади застосування edge computing у різних галузях.

Однією з ключових складових «розумного» виробничого процесу є прогностична аналітика. Прилади й датчики на основі технології промислового IoT на виробничому майданчику вимірюють не тільки температуру й вологість, але й показники електроенергії, характеристики двигуна та приводу, вібрації та інші змінні. Потім ці дані використовуються для точного прогнозування несправностей компонентів машини. Це підвищує показник загальної ефективності обладнання, який впливає на доступність, якість, ефективність і, звичайно, допомагає компаніям скоротити час простою. Наприклад, Volkswagen – один із провідних автомобільних концернів у світі, який використовує AWS IoT, машинне навчання та периферійні сервіси для роботи своєї промислової хмари. Він може об'єднувати дані з понад 120 заводів-виробників, щоб підвищити ефективність і час безвідмовної роботи заводів, підвищити гнучкість виробництва та забезпечити стандарти якості транспортних засобів [6].

Моніторинг активів у нафтовій і газовій промисловості. Енергетичні компанії використовують периферійні обчислення для збору та зберігання даних про нафтові вишки, газові родовища, вітрові турбіни та сонячні електростанції. Оператори бурових установок зазвичай розгортають граничний штучний інтелект для виявлення небезпек, оптимізації та перевірки своїх трубопроводів. Периферійні обчислення допомагають галузі підвищувати ефективність роботи, забезпечувати безпеку працівників і прогнозувати, коли необхідно виконати роботи з технічного обслуговування [6].

Охорона здоров'я. Медичні заклади прагнуть забезпечити високу якість і доступність медичної допомоги в найзручніших місцях для пацієнтів. Для реалізації цих ідей вони використовують технології на основі Інтернету речей, такі як цифрові медичні записи, цифрове формування зображення й телемедицину. У лікарні такі програми, як роботизована хірургія, потребують високонадійної IT-інфраструктури, яка вимагає рішень із периферійних обчислень [7].

Автономні транспортні засоби. Обчислення на периферії забезпечують миттєву обробку даних для координації конвоїв вантажівок та автомобілів. Це дозволяє мінімізувати затримку та покращити безпеку, що особливо важливо для автономного керування і взаємодії з інфраструктурою на місці.

Розумні електромережі. Периферійні обчислення допомагають управляти споживанням енергії у режимі реального часу. Наприклад, заводи можуть оптимізувати роботу обладнання під час низьких тарифів, що сприяє більш екологічному споживанню енергії.

Гральні сервіси у хмарі. Щоб зменшити затримки в ігрових процесах, компанії розміщують обчислювальні вузли ближче до гравців. Це робить ігри більш чуйними та підвищує рівень занурення користувача. Наприклад, компанія Riot Games розробляє, видає та підтримує найбільш орієнтовані на гравців ігри у світі, включаючи League of Legends, одну з найпопулярніших комп'ютерних ігор у світі. З глобальним запуском у 2020 році VALORANT, командного тактичного шутера, Riot хотіли зменшити «перевагу підглядання», спричинену затримкою і забезпечити конкурентоспроможність. Riot використовує AWS Outposts для швидкого розгортання ігрових серверів і зменшення затримки на 10–20 мілісекунд, зводячи до мінімуму перевагу підглядаючих і створюючи рівні умови для всіх гравців [6].

Висновки

У статті було здійснено огляд теоретичних основ периферійних обчислень. Наведено приклад найпоширеніших типів обладнання, які використовуються для реалізації граничних обчислень. Описано порівняння периферійних обчислень, хмарних обчислень і туманних обчислення. Розглянуто широкий спектр застосувань периферійних обчислень, зокрема у промисловому виробництві, охороні здоров'я, енергетиці, автономному транспорті, розумних електромережах та гральних сервісах.

Вибір оптимальної моделі обчислень залежить від конкретного застосування та вимагає ретельного аналізу вимог до системи. Використання периферійних обчислень дозволяє не лише розв'язувати питання затримок та оптимізувати обробку даних, але й сприяє підвищенню без-

пеки мережі завдяки локальній обробці чутливих даних. Крім того, ці обчислення ефективно доповнюють хмарні та туманні обчислення, забезпечуючи їх оптимальне поєднання залежно від вимог конкретних сценаріїв.

Науковий результат дослідження полягає у виявленні ролі периферійних обчислень як базису для впровадження сучасних мережних технологій, таких як 5G, IoT та AI, що сприяє створенню нових бізнес-моделей та інфраструктурних рішень. Особливо, важливо зараз, коли технологія 5G тільки починає розгортатись в Україні. Особливу увагу приділено вибору відповідного обладнання для периферійних обчислень, яке забезпечує стійкість, продуктивність та безпеку в умовах різного ступеня навантаження та середовищ експлуатації.

Підприємства використовують периферійні обчислення, щоб покращити час відгуку своїх віддалених пристроїв і отримати повнішу та своєчасну інформацію з даних пристроїв. Граничні обчислення роблять обчислення у реальному часі можливими в місцях, де зазвичай це неможливо і зменшують вузькі місця в мережах та центрах обробки даних, які підтримують периферійні пристрої.

Без периферійних обчислень величезний обсяг даних, створених периферійними пристроями, переповнив би більшість сучасних бізнес-мереж, перешкоджаючи всім операціям у враженій мережі. Витрати на IT можуть різко зрости. Незадоволені клієнти можуть перевести свій бізнес в інше місце. Але найважливіше те, що безпека працівників може бути поставлена під загрозу в галузях, які покладаються на інтелектуальні датчики для забезпечення їх безпеки.

Таким чином, периферійні обчислення виступають невід'ємним елементом сучасних розподілених систем, які забезпечують ефективне використання ресурсів мережі, підвищують її продуктивність і задовольняють зростаючі вимоги до якості та швидкості обробки даних.

Список літератури

1. Sydoruk A. Цікава статистика та факти про Інтернет речей (IoT): розмір ринку, використання та прогнози [Електронний ресурс] / Andrii Sydoruk // CASES. – Режим доступу: <https://cases.media/article/cikava-statistika-ta-fakti-pro-internet-rechei-iot-rozmir-rinku-vikoristannya-ta-prognozi> (дата звернення: 03.10.2024).
2. Singh A. / Ajit Singh // *Edge computing simply in depth: 2nd edition* : Електрон. кн. – 2-ге вид. – [Б. м.], 2024. – С. 8. – Режим доступу: https://www.google.com.ua/books/edition/Edge_Computing/6UQCEQAAQBAJ?hl=uk&g_bpv=0.
3. Bartley K. *Data Statistics (2024) - How much data is there in the world?* [Електронний ресурс] / Kevin Bartley // Rivery. – Режим доступу: <https://rivery.io/blog/big-data-statistics-how-much-data-is-there-in-the-world/> (дата звернення: 03.10.2024).
4. Microsoft. *What is edge computing?* | Microsoft Azure [Електронний ресурс] / Microsoft // Microsoft. – Режим доступу: <https://azure.microsoft.com/en-us/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-edge-computing> (дата звернення: 11.10.2024).
5. Contributors to Wikimedia projects. *Edge computing - Wikipedia* [Електронний ресурс], 2006 / Contributors to Wikimedia projects // Wikipedia, the free encyclopedia. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Edge_computing#/media/File:Edge_computing_infrastructure.png (дата звернення: 12.10.2024).
6. Amazon Web Services. *What is Edge Computing? - Edge Computing Explained - AWS* [Електронний ресурс] // Amazon Web Services, Inc. – Режим доступу: <https://aws.amazon.com/what-is/edge-computing/> (дата звернення: 03.10.2024).
7. Бураса Дж. *Що таке периферійні обчислення?* [Електронний ресурс] / Джеймі Бураса // Schneider Electric. – Режим доступу: <https://www.se.com/ua/uk/work/solutions/edge-computing/what-is-edge-computing.jsp> (дата звернення: 11.10.2024).

I. Buchenko, N. Lashchevska

THE ROLE OF EDGE COMPUTING IN COMPUTER NETWORKS

In modern computer networks, edge computing is becoming increasingly relevant, particularly due to its impact on the efficiency of data processing amidst the growing volume of data, the operation of network systems, real-time requirements, and the high demands for speed and security in information transmission.

The main challenges faced by traditional centralized computing systems include data processing delays, network congestion, rising costs for maintaining data centers, and risks to data confidentiality. The article highlights that edge computing can address these issues by processing data directly at the network edge, closer to the source of data generation. This approach reduces delays, optimizes network bandwidth usage, and enhances security by keeping data local.

With the rapid development of 5G and artificial intelligence (AI) technology, more and more intelligent devices are connected to the Internet, and the demand for computing services is also increasing. The traditional combination of cloud computing and the Internet of Things (IoT) has gradually revealed some drawbacks, such as transmission delay, greatly reduced transmission rate and network bandwidth pressure. Edge computing is a new computing paradigm. It puts the service near the physical edge of the end users. Due to its close proximity, dense distribution and low latency, edge computing can effectively reduce latency, improve transmission speed and relieve bandwidth pressure. At present, there are more and more researches on edge computing. It is necessary to discuss edge computing in general. The system mapping study uses the visualization method to summarize a specific field. This paper aims to introduce the development of edge computation in detail by means of a systematic mapping study.

This paper examines the concept, characteristics, and key aspects of edge computing, its role in computer networks, and its practical applications. Modern hardware solutions for implementing edge computing are explored. A comparison of edge, fog, and cloud computing is presented, highlighting their advantages, disadvantages, and areas of application. Practical examples of edge computing usage in industries such as healthcare, autonomous transport, energy, and gaming are provided. Recommendations are offered for selecting hardware and implementing edge computing based on the specific needs of users and organizations.

Keywords: computer network, edge computing, data center, cloud computing, Internet of Things, IoT, enterprise networks, computer network management.
